

蒙中地区充气膜结构和传统结构体育馆热环境对比

白叶飞¹, 赵淋涛¹, 康晓龙¹, 唐汝宁¹, 姜丝拉夫²

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古恒瑞能源综合管理有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 充气膜结构体育馆和传统结构体育馆主材热工性能不同, 造成两种结构体育馆的室内热环境响应明显不同。本文对蒙中地区充气膜结构和传统结构体育馆进行实地调研, 对两者的室内外空气温度、空气流速、壁面温度、太阳辐射照度等参数进行测量, 并选取5项评价指标(温度波动、温度均匀度、垂直空气温差、吹风感指数及PMV)对比分析两种结构体育馆室内热环境的差异性。研究表明: 充气膜结构体育馆室内外空气温度的延迟时间较短, 约为55 min, 而传统结构体育馆延迟时间约为100 min; 充气膜结构体育馆站立人群垂直温差可达2.26℃, 传统结构体育馆最大为0.55℃, 充气膜结构体育馆坐姿人群 $aPMV$ 为-1.40, 而传统结构体育馆为-0.92, 造成充气膜结构体育馆的热环境舒适性较差, 并且太阳辐射照度越强, 两者差异性越大。为了提高体育馆热舒适性, 充气膜结构体育馆的建议操作温度范围为9.48~13.11℃, 传统结构体育馆的范围为8.19~11.81℃。

关键词: 蒙中地区; 严寒地区; 充气膜结构; 体育馆; 热环境

中图分类号: TU111.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)01-0018-09

Comparison of thermal environment between gymnasium with membrane structure and traditional gymnasium in central Inner Mongolia

BAI Yefei¹, ZHAO Lintao¹, KANG Xiaolong¹, TANG Ru'ning¹, JIANG Silafu²

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Hengrui Energy Integrated Management Co. Ltd, Hohhot 010051, China)

Abstract: The thermal performance of the main materials of gymnasium with inflatable membrane structure is different from that of gymnasium with traditional structure, resulting in significantly different indoor thermal environmental responses of the two kinds of gymnasiums. In this study, a field research was carried out on the two kinds of gymnasiums in central Mongolia, and the indoor and outdoor air temperature, air velocity, wall temperature, solar radiation illuminance and other parameters were measured, and then, five evaluation indexes (temperature fluctuation, temperature uniformity, vertical air temperature difference, blowing sensation index and PMV) were selected to compare and analyze the difference of indoor thermal environment of two kinds of gymnasiums. The research results show that the delay time of indoor and outdoor air temperature in the gymnasium with inflatable membrane structure is relatively short, about 55 minutes, while the delay time of the gymnasium with traditional structure is about 100 minutes; the vertical temperature difference of the standing crowd in the gymnasium with inflatable membrane structure can reach 2.26℃, while the maximum temperature difference of the gymnasium with traditional structure is only 0.55℃, and the $aPMV$ of people sitting in the gymnasium with inflatable membrane structure is -1.40, while that in the gymnasium with traditional structure is -0.92, resulting in poor thermal environment comfort in gymnasium with inflatable membrane structure, and the stronger the solar radiation illuminance, the greater the difference between the two. In order to improve the thermal comfort of the gymnasium, the recommended operating temperature range of the gymnasium with inflatable membrane structure is 9.48~13.11℃, and the range of the gymnasium with traditional structure is 8.19~11.81℃.

Key words: the central Inner Mongolia area; severe cold area; membrane structure; gymnasium; thermal environment

收稿日期: 2021-07-29

修改稿日期: 2022-01-20

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2020LH05002, 2019MS05019)

第一作者: 白叶飞(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事可再生能源等方面研究, E-mail: baiyefei@imut.edu.cn

通信作者: 赵淋涛(1996—), 男, 硕士生, 主要从事建筑室内热舒适研究, E-mail: 619206618@qq.com

随着现代建筑业的发展,充气膜结构凭借其自重轻、施工周期短、经济效益良好、具有较好的透光性与自洁性等特点^[1-4],在我国应用越来越广泛,特别是体育馆等高大空间建筑^[5-7]。与传统结构体育馆相比,充气膜结构体育馆使用较为轻薄的膜材料作为建筑材料,而传统结构体育馆一般使用混凝土砌块作为围护结构主体材料,两种材料在保温隔热等热工性能方面存在明显差异,造成两者的热响应机理不同,从而两种结构体育馆室内热环境的舒适和稳定也有较大差别^[8-9]。因此,有必要对两种结构体育馆室内热环境进行分析,对比两者差异。

现有文献中主要是针对单一结构的体育馆室内热环境进行研究。对于传统结构体育馆研究比较充分,文献[10]通过对西安建筑科技大学体育馆室内热环境进行分析,得出影响体育馆室内热环境主要受太阳辐射、空气温度、湿度及风速等气候因素以及体育馆围护结构、室内设备和人为因素的影响;文献[11-12]主要对于不同界面形式对体育馆室内热环境的影响进行分析,得出不同界面形式体育馆的热环境差异主要受平均辐射温度及风速的影响;文献[13]主要研究空调机组分布对于室内热环境的影响,得出体育馆比赛区域上方四周环绕式送风能够较好实现室内热环境均匀营造;文献[14]主要对不同季节的体育馆室内热环境进行研究,得出不同季节的热期望温度等室内热环境的变化规律;文献[15]主要对体育馆室内不同人群的热舒适进行研究,建立了不同人群的适应性热舒适模型和对应的热舒适范围。对于充气膜结构体育馆室内热环境研究较少,文献[16-17]通过对夏热冬冷地区封闭式充气膜结构体育馆室内热环境进行测试,得出太阳辐射对于室内热环境存在影响,且该地区的充气膜结构体育馆难以满足室内热环境的舒适性要求。

然而内蒙古中部位于严寒地区,相比于夏热冬冷地区,该地区冬季漫长寒冷,平均空气温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥多风、昼夜温差大,并且太阳辐射照度较强^[18-19],该地区冬季体育建筑室内环境过冷是该地区建筑面临的主要问题。因此,本文选择蒙中地区充气膜结构体育馆和传统结构体育馆进行实地调研,对其室内、外热环境参数进行测量并记录,对比两者热环境差异,为该地区不同结构体育馆的发展提供借鉴意义。

1 研究对象

选择呼和浩特市充气膜结构体育馆(下文称为气膜馆)和传统结构体育馆(下文称为传统馆)进行实地调研,两体育馆室外环境都较为空旷,无高大建筑物遮挡且周围留有人群集散空间,室内高度超过 10 m ,并且中间场地人员密度小,具有典型高大空间特征^[20],两者室内、外环境基本相似,其室内外环境如图1所示。

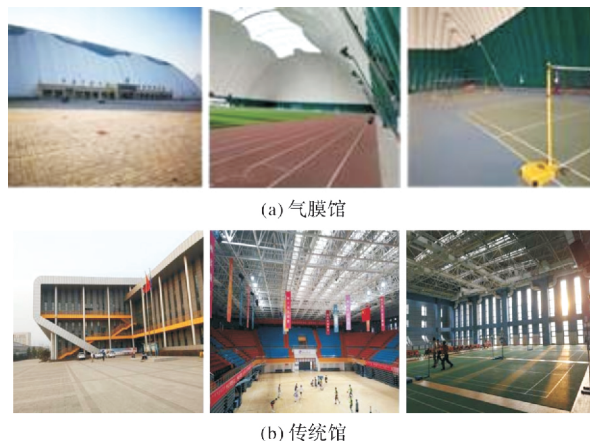


图1 体育馆现场环境

Fig. 1 On-site environment of the two stadiums

气膜馆为气承膜结构,外膜采用具有PVF膜材,内膜采用PVDF膜材,中间保温材料选用玻璃纤维棉双面覆铝箔玻纤布,设有2个旋转门、7个常闭应急门以及1个常闭车辆货物进出门;传统馆屋面为钢结构,主体为钢筋混凝土框架结构,外设绝热用挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(XPS)保温层,外门选用节能外门,外窗采用铝合金双层Low-E中空玻璃。

2 实测计划

2.1 实测时间

实地调研在冬天(气膜体育馆:2020年12月18日~2020年12月24日、传统体育馆:2020年12月30日~2021年1月5日)各选择7d进行连续测量,de Dare等人指出7d足够包含最近气候的动态变化,并且足够捕捉到气候的暂时记忆,因此建议在热环境的研究中使用7d连续测量^[21]。此外,实测时间段内两体育馆均为封闭状态,无赛事举办,室内人群较少,开关门频率也都较少,并且暖通系统都处于非比赛运行状态。

2.2 测量仪器及参数

参数测量包括室外及室内环境参数的测量。室外参数为室外温度、相对湿度以及太阳辐射照

度等,室内参数为不同结构壁面热流、壁面温度以及室内不同方位和高度的温度、空气流速等。

所有参数的测量均为不同测点处仪器测量结

果加权平均得到,符合规范《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T 50785-2012 中的要求。具体测量仪器如下表 1 所示。

表 1 测量仪器及其量程、精度
Tab. 1 Measuring instruments and their ranges and accuracy

仪器名称	型号	测量参数	量程和精度
温湿度记录仪	testo 174H	室内外空气温度	$-20\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C};\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		室内外相对湿度	$0\sim 100\%\text{ RH};\pm 3\%\text{ RH}$
多参数室外气象站	JTR13	室外空气温度	$-30\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C};\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		室外相对湿度	$0\sim 100\%\text{ RH};\pm 3\%\text{ RH}$
		太阳辐照度	$0\sim 2\,000\text{ W/m}^2;\pm 4\%$
室内空气质量与热舒适度测试仪	JT-IAQ	室内空气温度	$-20\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C};\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		室内黑球温度	$-20\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C};\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
		室内空气流速	$0.05\sim 5\text{ m/s};\pm 2\%$
		室内相对湿度	$0\sim 100\%\text{ RH};\pm 3\%\text{ RH}$
		室内壁面热流	$0\sim 2\,000\text{ W/m}^2;\pm 4\%$
多通道温度热流测试仪	JTNT-A	室内壁面温度	$-50\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C};\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.3 测点布置方案

为了研究不同结构体育馆室内整体热环境,仪器被放置在不同方向及不同高度的看台处,并且尽量布置在体育馆中线处,若该方向无看台,则将仪器布置自备的支架上,测点布置尽量避免人为及其他因素的扰动影响。

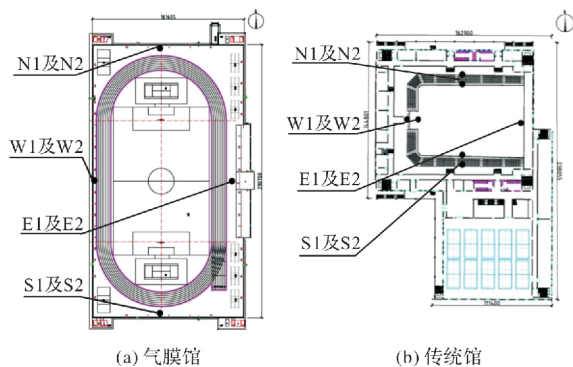


图 2 整体热环境测点布置方案

Fig. 2 Layout of measuring points for overall thermal environment

测点布置如图 2 所示,测点分别布置在场地南侧、北侧、西侧及东侧的 1 m 及 4 m 高度处,共设置 8 个测点,分别标记为 S1~S2、N1~N2、W1~W2、E1~E2。其中,S、N、W、E 表示测点位于场地的南侧、北侧、西侧及东侧,1、2 分别表示 1 m 及 4 m 高度。

为了研究不同结构体育馆室内运动场地热环境,每个体育馆随机选取 2 个羽毛球场地,仪器被放置在场地不同方向及不同高度处,并将室内人群分为两类,分别为坐姿人群以及站姿人群,其中坐姿人群主要对应观众人群及运动后人群,站姿人群主要对应运动人群。

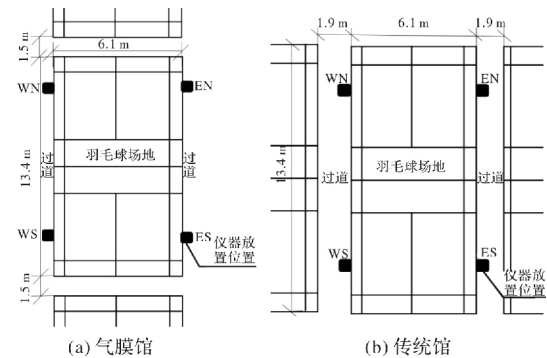


图 3 两体育馆场地测量仪器布置图

Fig. 3 Layout of measuring instruments for the two stadiums

测点布置如图 3 所示,测点分别布置在场地西南侧、东南侧、西北侧及东北侧 4 个方向处,每个方向设置三种高度,分别为 0.1 m、1.1 m 及 1.7 m。其中,0.1 m 表征坐姿及站姿人群的脚踝高度、1.1 m 表征坐姿人群的头部高度、1.7m 表征站姿人群的头部高度。每个场地共设置 12 个测点,分别标记为 WS1~WS3、ES1~ES3、WN1~WN3、EN1~EN3。其中,WS、ES、WN、EN 表示测点位于场地的西南侧、东南侧、西北侧及东北侧,1、2、3 分别表示 0.1 m、1.1 m 及 1.7 m 高度。

3 研究结果

分析室内外空气温度测量结果可得,传统馆室内外温差较大,7 d 内的室内外平均温差为 20.40 $^{\circ}\text{C}$,气膜馆室内外空气温差较小,7 d 内的室内外平均温差为 18.65 $^{\circ}\text{C}$ 。

由于研究中 7 d 的温度等参数变化曲线不明显,为了使温度等因素的变化趋势更加明显,部

分研究截取 24 h 数据进行分析,但选取的研究时段与 7 d 的变化规律基本一致。

3.1 室内外空气温度、内壁面温度及太阳辐射照度的分布规律

图 4 为气膜馆(2020 年 12 月 20 日)和传统馆(2021 年 1 月 3 日)的室内外空气温度、西侧围护结构的内壁面温度及太阳辐射照度在 24 h 内的变化情况。

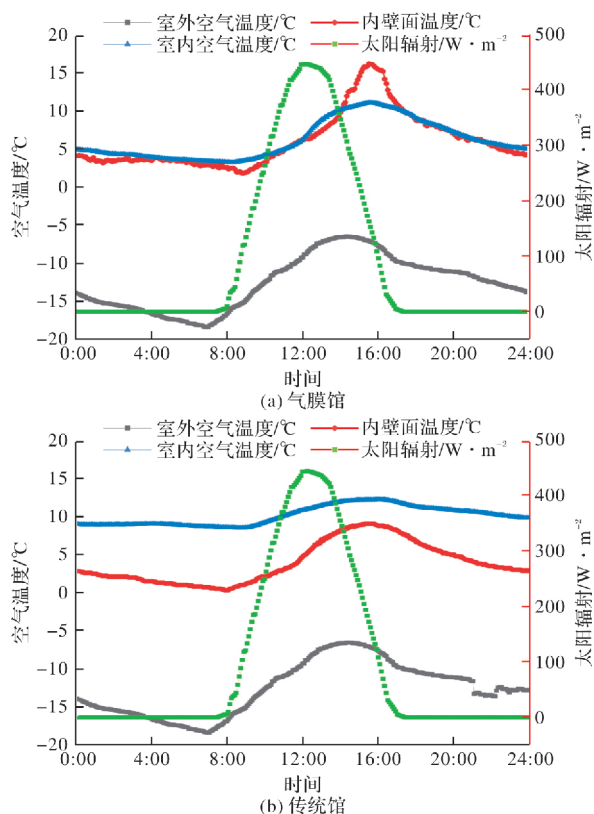


图 4 室内外空气温度、内壁面温度及辐射照度变化曲线
Fig. 4 Variation curves of indoor and outdoor air temperature, inner wall temperature and radiation illuminance

由图 4 可知,气膜馆和传统馆的太阳辐射照度及室外空气温度的变化趋势比较接近。两者室外太阳辐射主要出现在 8:00~17:00 时间段内,并于 12:30 左右达到最大值,分别为 448 W/m^2 、 431 W/m^2 ;两者室外空气温度最大值出现在 14:10 左右,分别为 $-5.21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

气膜馆及传统馆的室内空气温度和内侧壁面温度的变化趋势开始出现较大差别。

气膜馆的室内空气温度及内侧壁面温度达到最大值的时间较为同步,于 15:05 左右同时达到最大值,室内空气温度最大值为 $12.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$,室内壁面温度最大值为 $15.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$,壁面温度最大值超过室内空气温度,室内空气温度、室内壁面温度与室外空气温度的延迟时间都约为 55 min。

传统馆的室内空气温度及内侧壁面温度的达到最大值的时间不同,首先壁面温度于 15:20 左右达到最大值 $9.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,然后室内温度于 15:50 左

右达到最大值 $11.49 \text{ }^{\circ}\text{C}$,室内空气温度与室外空气温度的延迟时间约为 100 min,内侧壁面温度与室外空气温度的延迟时间约为 70 min。

出现这种差别的原因主要是由于两者的围护结构的蓄热性能及透射作用存在差异。由于气膜馆的主材为膜材,质轻,蓄热系数较小,使得壁面温度和室内温度的变化比较同步、室内外空气温度延迟时间较短,并且由于透射作用的存在,太阳辐射对于气膜馆室内热环境影响较为显著,造成室内壁面温度最大值高于室内空气温度最大值,而传统馆围护结构主要为混凝土砌块,质量较重,蓄热性能优于膜材,使得室内温度的变化要滞后于壁面温度,室内外空气温度延迟时间较长,并且混凝土砌块没有透射作用,太阳辐射对传统馆室内热环境影响较小,因此,室内侧壁面温度一直低于室内空气温度。

3.2 不同高度及方位室内空气温度的分布规律

图 5 表示气膜馆(2020 年 12 月 20 日)和传统馆(2021 年 1 月 3 日)的室内空气温度在不同高度及朝向上的 24 h 变化趋势。

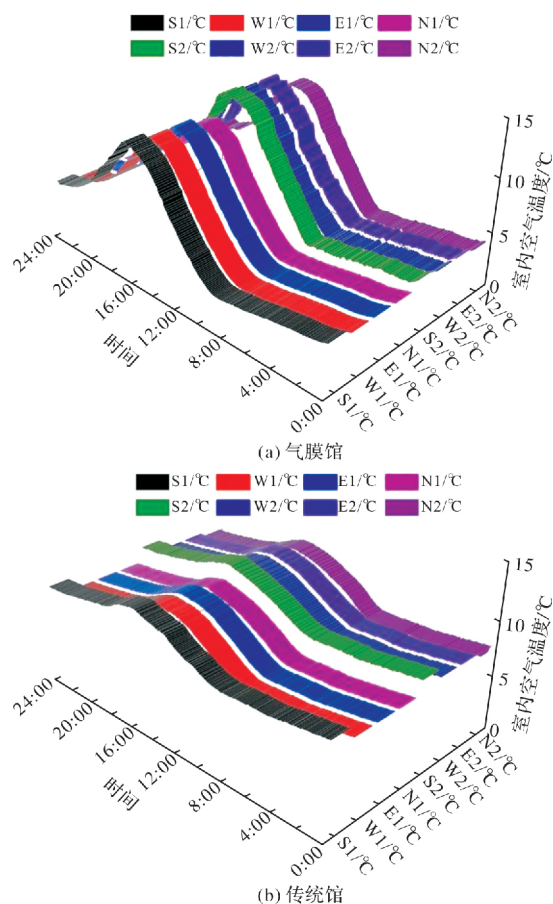


图 5 两体育馆室内整体温度变化趋势
Fig. 5 Variation trend of indoor overall temperature in two gymnasiums

计算不同测点的平均温度,结果如表 2 所示。

表2 体育馆不同测点平均温度

Tab. 2 Average temperature of different measuring points in the gymnasium

	S1/℃	W1/℃	E1/℃	N1/℃	S2/℃	W2/℃	E2/℃	N2/℃
气膜馆	6.47	6.01	5.98	5.79	7.55	6.71	6.75	6.23
传统馆	9.00	8.12	8.08	7.95	9.26	8.39	8.41	8.12

结合分析图5及表2进行分析,两种结构体育馆竖直方向上的室内温度分布规律为:体育馆高度越高,空气温度越高;水平方向上的室内温度分布规律为:南侧平均温度最高,北侧最低,西侧和东侧居中且相差不大。该结论与《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ26-2010中,呼和浩特地区不同朝向太阳辐射大小排序相同,说明太阳辐射对两种结构体育馆的室内温度都存在影响。

但气膜馆温度波动较为剧烈,24 h内温度波动达到9.42℃,传统馆温度波动较为平缓,波幅为3.40℃。造成这种现象的原因是气膜结构热惰性较小,室内温度与室外扰动之间的衰减作用较小。

3.3 室内空气流速的分布规律

将风速测点布置在无人群扰动,且远离气膜馆充气口位置,以减少无关因素的影响,风速测量结果如图6所示。

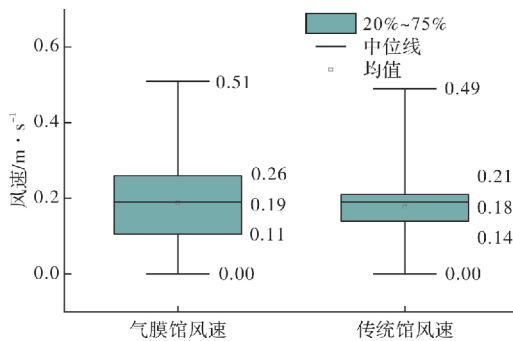


图6 室内风速桶箱图

Fig. 6 Diagram of indoor wind speed barrel box

由图6可知,气膜馆风速分布较为分散且风速较大,最大值为0.51 m/s,最小值为0 m/s,变化范围集中在0.11~0.26 m/s之间,均值为0.19 m/s;传统馆风速分布较集中且风速较小,最大值为0.49 m/s,最小值为0 m/s,风速变化范围集中在0.14~0.21 m/s之间,均值为0.18 m/s。根据《体育建筑设计规范》JGJ31-2003中的规定,体育馆室内冬季气流速度小于0.2 m/s较为适宜,因

此,两体育馆风速均值都满足规范要求。

4 室内热环境评价

根据《室内人体热舒适环境要求与评价方法》GB/T 33658-2017中的规定,本文选择温度波动、温度均匀度、垂直空气温差、吹风感指数、PMV,共5项热环境评价参数,并结合体育馆开放时间(8:00~20:00)对两种结构体育馆热环境舒适性进行评价。

4.1 温度波动

温度波动表示当室内环境达到热稳定状态后,规定时间段内室内测点的变化幅度,整体温度波动 T_{fw} 为所有单个测点温度波动的平均值。

单个测点的温度波动 T_f 计算公式如下:

$$T_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} (t_i - t_a)^2}{N_i - 1}} \quad (1)$$

式中: N_i 为规定时间内该测点记录的温度个数; t_i 为该测点的瞬时温度,℃; t_a 为该测点在规定时间内的平均温度,℃。

根据公式(1)得到,得到体育馆开放时间段内,气膜结构体育馆的平均温度波动为2.24℃,传统结构的平均温度波动为1.75℃,气膜馆温度波动较大,由此造成的室内热环境也较差。

4.2 温度均匀度

温度均匀度表示当室内环境达到热稳定状态后,同一时刻不同测点温度的差异状况,整体温度均匀度 T_{sw} 为所有时刻瞬时室内温度均匀度的平均值。

第*i*时刻的瞬时室内温度均匀度 T_s 计算公式如下:

$$T_s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{M_i} (t_j - t_b)^2}{M_i - 1}} \quad (2)$$

式中: M_i 为室内温度测点总数; t_j 为单个测点的瞬时温度,℃; t_b 为所有测点的瞬时平均温度,℃。

结合公式(2), 得到体育馆开放时间段内, 气膜结构的温度均匀度为 0.26°C , 传统结构的温度均匀度为 0.19°C , 气膜馆温度均匀度较大, 由此造成的室内热环境也较差。

4.3 垂直空气温差

垂直空气温差定义为当室内环境达到热稳定状态后, 垂直方向上存在的空气温差。由于人群头部和脚踝处的垂直空气温差会导致室内人群不舒适, 因此本文研究两种结构体育馆不同人群的垂直温差 $\Delta t_{a,v}$, 计算公式如下。

$$\Delta t_{a,v} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (t_{head,i} - t_{foot,i})}{N_i} \quad (3)$$

式中: N_i 为规定时间内该测点记录的温度个数; $t_{head,i}$ 为 i 时刻头部的温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{foot,i}$ 为 i 时刻脚踝处的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据公式(3)得到, 体育馆运行时间段内, 气膜馆站姿人群的垂直温差为 1.43°C , 坐姿人群垂直温差为 1.05°C ; 传统馆站姿人群的垂直温差为 0.45°C , 坐姿人群垂直温差为 0.42°C 。可见, 气膜馆内不同人群的垂直温差较大。

图 7 表示不同结构不同人群的垂直温差在 24 h 内的变化趋势。

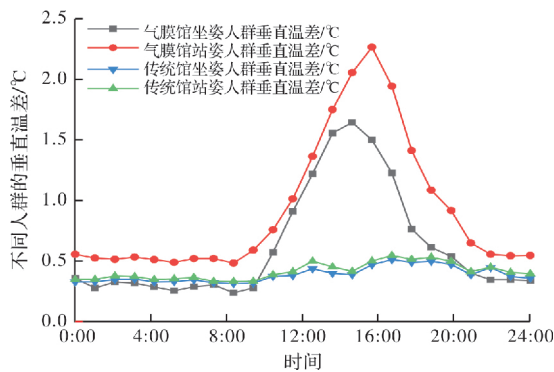


图 7 不同结构不同人群垂直温差变化趋势

Fig. 7 Variation trend of head-to-foot temperature difference of different groups of people

由图 7 可知, $0:00 \sim 8:30$ 之间两种结构不同人群的垂直温差相差不大, 主要集中在 $0.2 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 之间; $8:30 \sim 20:30$ 之间, 气膜馆的垂直温差开始明显大于传统馆, 气膜馆站姿人群垂直温差于 $15:00$ 左右达到最大值 2.26°C , 气膜馆坐姿人群垂直温差于 $14:00$ 左右达到最大值 1.64°C , 传统馆垂直温差最大于 $16:00$ 左右达到, 站

姿人群为 0.55°C , 坐姿人群为 0.51°C 。

根据以上结果可知, 气膜馆由于垂直温差造成热环境较为不舒适, 且主要体现在出现太阳辐射的时间段。

4.4 吹风感指数

根据《室内人体热舒适环境要求与评价方法》GB/T 33658-2017 中的规定, 分别计算两种结构体育馆的吹风感指数(DR: 由于气流带走人体热量所导致的不满意人群占比, 为所有测点吹风感指数的平均值), 测点 j 吹风感指数的计算公式如下。

$$DR_j = (34 - t_a)(v_a - 0.05)^{0.62}(0.37 \times v_a \times T_v + 3.14) \quad (4)$$

式中: DR_j 为第 j 检测点的吹风感指数, 若 $DR_j > 100\%$, 则取 $DR_j = 100\%$; t_a 为局部平均空气温度, $^{\circ}\text{C}$; v_a 为局部平均空气流速, m/s , 若 $v_a < 0.05 \text{ m/s}$, 则 v_a 取 0.05 m/s ; T_v 为局部紊流强度, $\%$, 即局部空气流速的标准差与 v_a 的比。

基于公式(4), 计算得到气膜馆的吹风感指数为 25.85% ; 传统馆的吹风感指数为 24.26% 。由以上结果可知, 传统体育馆的吹风感指数较低, 由风环境造成的热舒适较为优良。

4.5 预测平均热感觉投票值(PMV)

由于 PMV 为综合性评价指标, 不仅与由实验测得空气温度、空气流速、相对湿度、平均辐射温度 4 个环境因素有关, 还与调研得到的衣服热阻以及人体代谢率 2 个人体因素有关。因此, 对随机挑选进入两种结构体育馆的不同人群的热阻及运动状态、类型等进行调研, 并 ASHRAE Standard 及其他文献[22-23], 规定不同人群的衣物热阻及代谢率, 如下表 3 所示:

表 3 不同人群衣物热阻及代谢率

Tab. 3 Clothing thermal resistance and metabolic rate of different groups of people

	人群种类	衣物热阻/clo	代谢率/met
站姿人群	运动人群	0.6~1.0	5.5~7.4
坐姿人群	观众人群、运动后人群	1.0~1.5	1.0~1.2

结合以上参数, 通过 PMV-PPD 计算程序计算出两种结构体育馆不同人群的 PMV-PPD。由于研究中表明, PMV-PPD 评价体系对于人体的适应性未考虑充分, 使得被试者的实际热感觉与

PMV模型预测的热感觉存在偏差,并且PMV-PPD评价体系适用于处于轻体力劳动和衣着较为单薄的人员。因此,需要根据调研结果对原始模型进行修正。

本研究引入适应系数 λ 修正模型^[24],即适应性PMV模型($aPMV$ - $aPPD$),公式(5)~(6)如下所示。

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda PMV} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N 1/TSV_i - \sum_{i=1}^N 1/PMV_i}{N} \quad (6)$$

将建立模型时采用温度频率法划分的每组 PMV_i 和 TSV_i ,代入公式(6)进行计算,得到气膜馆坐姿人群模型的适应系数 $\lambda = -0.19$,站姿人群模型的适应系数 $\lambda = 0.28$;传统馆坐姿人群模型的适应系数 $\lambda = -0.15$,站姿人群模型的适应系数 $\lambda = 0.31$ 。将 λ 代入公式(5)中,得到不同时刻的 $aPMV$ 值。然后,将得到的 $aPMV$ 作为因变量,与操作温度 t_{op} 作为自变量进行拟合,得到如图8所示的两体育馆不同人群的 $aPMV$ 模型。

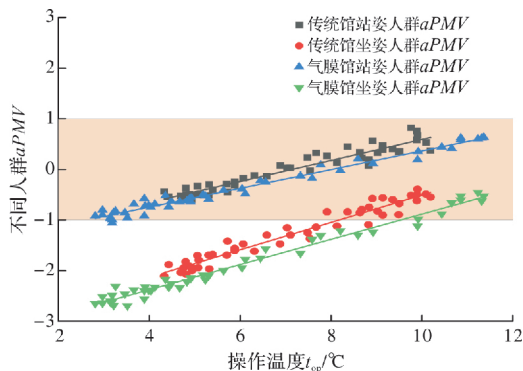


图8 两体育馆不同人群的 $aPMV$ 模型

Fig. 8 $aPMV$ model of different groups of people in two gymnasiums

按照国际标准化组织推荐的热舒适环境PMV值7个等级标度分别为: -3冷、-2凉、-1稍凉、0舒适、+1稍暖、+2暖、+3热。根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T 50785-2012规定,当PMV在-1~+1之间,被认为是I~II级热舒适环境,基本符合“适中”的热舒适要求。因此,本文将 $aPMV = \pm 1$ 时,得到温度范围作为热舒适范围。

由图8可知,在体育馆开放时间段内,气膜馆站姿人群的平均热舒适为-0.028,传统馆为

0.27,两体育馆的站姿人群热舒适要求基本能够得到满足,但气膜馆坐姿人群平均热舒适为-1.40,而传统馆为-0.92,说明坐姿人群的热舒适性在气膜馆中较差。

总结图8中的 $aPMV$ 与 t_{op} 的回归方程并计算对应人群的热舒适范围,结果如表4所示。

表4 不同人群PMV与 t_{op} 的回归方程

Tab. 4 Regression equation of PMV and t_{op} in different populations

人群种类	回归方程及 R^2	热舒适范围/°C
气膜馆 站姿人群	$aPMV = 0.19t_{op} - 1.49$ $R^2 = 0.975$	2.58~13.11
	$aPMV = 0.25t_{op} - 3.37$ $R^2 = 0.980$	9.48~17.48
传统馆 站姿人群	$aPMV = 0.21t_{op} - 1.48$ $R^2 = 0.913$	2.29~11.81
	$aPMV = 0.27t_{op} - 3.21$ $R^2 = 0.945$	8.19~15.59

由表4可知,为了尽可能满足所有人群的热舒适要求,因此,建议气膜馆的操作温度范围为9.48~13.11 °C,传统馆的范围为8.19~11.81 °C。

5 结 论

本论文以蒙中地区气膜结构体育馆和传统结构体育馆为研究对象,采集两种体育馆室内外热环境参数,并进行对比分析,研究结果如下:

(1)由于两体育馆围护结构主材不同,充气膜结构体育馆的室内外空气温度的延迟时间较短,约为55 min,传统结构体育馆延迟时间约为100 min,且充气膜结构体育馆室内空气温度的波动较为剧烈,24 h内的波幅达到9.42 °C,传统结构体育馆的波幅为3.40 °C。可采用增设蓄热性能较好的材料,降低充气膜结构体育馆的室内温度的波动程度。

(2)由于两体育馆暖通系统不同,气膜结构体育馆风速分布较为分散,但两体育风速均值都满足规范小于0.2 m/s的要求。气膜结构体育馆风速变化范围集中在0.11~0.26 m/s之间,均值为0.19 m/s,而传统结构体育馆风速变化范围为0.14~0.21 m/s,均值为0.18 m/s。

(3)充气膜结构体育馆站姿人群垂直温差可达

2.26℃,传统结构体育馆为0.55℃,充气膜结构体育馆的其余热环境评价指标均不及传统结构,造成充气膜结构体育馆的热环境较差,并且太阳辐射照度越强,两者差异性越大。

(4)在体育馆开放时间段内,两体育馆的站姿人群热舒适要求基本能够得到满足,但气膜馆坐姿人群的热舒适性不满足热舒适要求,坐姿人群平均热舒适为-1.40,而传统馆为-0.92,为了提高体育馆热舒适性,气膜馆的建议操作温度范围为9.48~13.11℃,传统馆的范围为8.19~11.81℃。

参考文献 References

- [1] 高新京,吴明超.膜结构工程技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2010,3-19.
GAO Xinjing, WU Mingchao. Membrane structure engineering technology and its application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010, 3-19.
- [2] 张其林.膜结构在我国的应用回顾和未来发展[J].建筑结构,2019,49(19):55-64.
ZHANG Qilin. Review and future development of the application of membrane structure in my country[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 55-64.
- [3] HU J, CHEN W, ZHAO B, et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior[J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 411-422.
- [4] HU J, CHEN W, CAI Q, et al. Structural behavior of the PV-ETFE cushion roof[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 101(Apr.):169-180.
- [5] 薛素铎,李亚明,周观根,等.充气膜结构设计及施工技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2019,1-13.
XUE Suduo, LI Yaming, ZHOU Guangen et al. Technical guide for the design and construction of inflatable membrane structures [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2019, 1-13.
- [6] LI X, WANG D. Study on application of membrane structure in the sports building[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3489: 295-299.
- [7] HUA Suo, ADRIANA Angelotti, Alessandra Zanelli. Thermal-physical behavior and energy performance of air-supported membranes for sports halls: A comparison among traditional and advanced building envelopes [J]. Energy & Buildings, 2015, 109: 35-46.
- [8] MILOJEVI V S, MARKOVI B L. Comparison of point and snow load deflections in design and analysis of tensile membrane structures[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 1-11.
- [9] KUMAR A, SUMAN B M. Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate[J]. Building and Environment, 2013, 59(1): 635-643.
- [10] 董洪庆.西安建筑科技大学体育馆室内热环境分析[J].山西建筑,2011,37(7):189-190.
DONG Hongqing. Analysis of Indoor Thermal Environment of Xi'an University of Architecture and Technology Gymnasium[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(7): 189-190.
- [11] HUANG X, MA X, ZHANG Q. Effect of building interface form on thermal comfort in gymnasiums in hot and humid climates[J]. Frontiers of Architectural Research, 2019, 8(1): 32-43.
- [12] 吴万昕.基于运动人群热可接受度的广州地区体育训练馆界面形式对比研究[D].广州:华南理工大学,2019.
WU Wanxin. A Comparative Study on the Interface Forms of Sports Training Halls in Guangzhou Based on the Thermal Acceptability of Sports Crowd[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [13] 马勇,邵晓亮,周学政,等.空调机组对体育馆室内局部热环境控制的研究[J].西安体育学院学报,2017,34(5):520-525.
MA Yong, SHAO Xiaoliang, ZHOU Xuezheng, et al. Research on the control of local thermal environment in gymnasium by air-conditioning units[J]. Journal of Xi'an Institute of Physical Education, 2017, 34(5): 520-525.
- [14] 李晋,卢频,郑海林.亚热带地区自然通风体育馆室内热舒适范围[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(5):173-182.
LI Jin, LU Pin, ZHENG Hailin. Indoor thermal comfort range of natural ventilation gymnasium in subtropical area[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(5): 173-182.
- [15] 黄晓丹,刘佳妮,郭文智.广州地区自然通风体育馆室内热舒适研究[J].暖通空调,2019,49(4):133-138.

- HUANG Xiaodan, LIU Jiani, GUO Wenzhi. Research on indoor thermal comfort of natural ventilation gymnasiums in Guangzhou area[J]. HVAC, 2019, 49(4): 133-138.
- [16] 阴悦, 胡建辉, 陈务军, 等. 封闭式膜结构体育馆冬季热环境测试[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(11): 1452-1458.
- YIN Yue, HU Jianhui, CHEN Wujun, et al. Winter thermal environment test of closed membrane structure gymnasium[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(11): 1452-1458.
- [17] HU J, CHEN W, ZHANG S, et al. Thermal characteristics and comfort assessment of enclosed large-span membrane stadiums[J]. Applied Energy, 2018, 229: 728-735.
- [18] 李金平, 王兆福, 王航, 等. 严寒地区主被动太阳能协同采暖室内舒适度研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 584-590.
- LI Jinping, WANG Zhaofu, WANG Hang, et al. Study on indoor comfort of active and passive solar energy coordinated heating in severe cold area[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. and Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 584-590.
- [19] 王文新, 梁雨, 李金娟, 等. 内蒙地区农宅围护结构太阳辐射吸收系数研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 730-739.
- WANG Wenxin, LIANG Yu, LI Jinjuan, et al. Research on solar radiation absorption coefficient of farmhouse enclosure in Inner Mongolia[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. and Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 730-739.
- [20] 范存养. 大空间建筑空调设计及工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011, 4-13.
- FAN Cunyang. Air conditioning design and engineering record of large space buildings[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011, 4-13.
- [21] DE DEAR R, BRAGER G. Towards an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(1): 145-167.
- [22] AINSWORTH B E, HASKELL W L, WHITT M C, et al. Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2000, 32(9): 498-504.
- [23] BUTTE N F, WATSON K B, RIDLEY K, et al. A youth compendium of physical activities: Activity codes and metabolic intensities[J]. Medicine and science in Sports and Exercise, 2018, 50(2): 246-256.
- [24] 党睿, 闫紫薇, 刘魁星, 等. 寒冷地区大型商业综合体冬季室内热舒适评价模型研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 16-21.
- DANG Rui, YAN Ziwei, LIU Kuixing, et al. Research on evaluation model of indoor thermal comfort in large commercial complex in cold area[J]. Architecture Science, 2017, 33(12): 16-21.

(编辑 桂智刚)